

DOI: 10.1126 / science.1155121 Science 320, 1444 (2008); Gordon B. Bonan y col. y los beneficios climáticos de los bosques Los bosques y el cambio climático: forzamientos, retroalimentaciones, esta copia es solo para uso personal y no comercial. colegas, clientes o clientes haciendo clic aquí. Si desea distribuir este artículo a otros, puede solicitar copias de alta calidad para seguir las pautas aquí. Puede obtener permiso para volver a publicar o reutilizar artículos o partes de artículos (esta información está actualizada al 20 de octubre de 2010): Los siguientes recursos relacionados con este artículo están disponibles en línea en www.sciencemag.org <http://www.sciencemag.org/cgi/content/full/320/5882/1444> versión de este artículo en: La información y los servicios actualizados, incluidas las cifras de alta resolución, se pueden encontrar en el <http://www.sciencemag.org/cgi/content/full/320/5882/1444> / DC1 El material de apoyo en línea se puede encontrar en: encontrado en: Una lista de artículos adicionales seleccionados en los sitios web de Science relacionados con este artículo puede ser <http://www.sciencemag.org/cgi/content/full/320/5882/1444#related-content>

<http://www.sciencemag.org/cgi/content/full/320/5882/1444#otherarticles> Este artículo cita 45 artículos, 14 de los cuales se pueden acceder de forma gratuita : Este artículo ha sido citado por 89 artículo (s) en el ISI Web of Science.

<http://www.sciencemag.org/cgi/content/full/320/5882/1444#otherarticles> Este artículo ha sido citado por 8 artículos alojados por HighWire Press; ver: <http://www.sciencemag.org/cgi/collection/atmos> Atmospheric Science Este artículo aparece en las siguientes colecciones temáticas: marca registrada de AAAS. 2008 por la Asociación Americana para el Avance de la Ciencia; todos los derechos reservados. El título Science es una Asociación Estadounidense para el Avance de la Ciencia, 1200 New York Avenue NW, Washington, DC 20005. Copyright Science (impreso ISSN 0036-8075; en línea ISSN 1095-9203) se publica semanalmente, excepto la última semana de diciembre, el 20 de octubre de 2010 www.sciencemag.org

Descargado de REVIEW Bosques y cambio climático: forzamientos, retroalimentaciones y los beneficios climáticos de los bosques Gordon B. Bonan Los bosques del mundo influyen en el clima a través de procesos físicos, químicos y biológicos que afectan los planetas. energética, ciclo hidrológico y composición atmosférica. Estas interacciones bosque-atmósfera complejas y no lineales pueden amortiguar o amplificar el cambio climático antropogénico. La reforestación y forestación tropical, templada y boreal atenúan el calentamiento global a través del secuestro de carbono. Las retroalimentaciones biogeofísicas pueden mejorar o disminuir este forzamiento climático negativo. Los bosques tropicales mitigan el calentamiento a través del enfriamiento por evaporación, pero el bajo albedo de los bosques boreales es un factor climático positivo. El efecto evaporativo de los bosques templados no está claro. Se desconoce el forzamiento climático neto de estos y otros procesos. Los bosques están bajo una tremenda presión por el cambio global. La ciencia interdisciplinaria que integra el conocimiento de los muchos servicios climáticos de los bosques que interactúan con los impactos del cambio global es necesaria para identificar y comprender las retroalimentaciones aún inexploradas en el sistema de la Tierra y el potencial de los bosques para mitigar el cambio climático. Los bosques cubren ~ 42 millones de km² en tierras tropicales, templadas y boreales, ~ 30% de la superficie terrestre (Fig. 1A). Estos bosques brindan servicios ecológicos, económicos, sociales y estéticos a los sistemas naturales y a la humanidad (1), incluidos refugios para la biodiversidad, provisión de alimentos, medicamentos y productos forestales, regulación del ciclo hidrológico, protección de los recursos del suelo, usos recreativos, necesidades espirituales y valores estéticos. Además, los bosques influyen en el clima a través del intercambio de energía, agua, dióxido

de carbono y otras especies químicas con la atmósfera. Los bosques almacenan ~ 45% del carbono terrestre (Fig. 1B), contribuyen ~ 50% de la producción primaria neta terrestre (2) y pueden secuestrar grandes cantidades de carbono anualmente (Fig. 1C). La absorción de carbono por parte de los bosques contribuyó a un sumidero de carbono terrestre "residual" 2.6 Pg C año⁻¹ en la década de 1990, ~ 33% de la emisión antropogénica de carbono por los combustibles fósiles y el cambio en el uso de la tierra (3). Los bosques tienen un albedo de baja superficie y pueden enmascarar el alto albedo de la nieve (Fig. 1D), lo que contribuye al calentamiento planetario a través del aumento del calentamiento solar de la tierra. Los bosques mantienen el ciclo hidrológico a través de la evapotranspiración, que enfría el clima mediante retroalimentaciones con nubes y precipitaciones. La relación de evapotranspiración a energía disponible es generalmente baja en el bosque en comparación con algunos cultivos y menor en los bosques de coníferas que en los bosques caducifolios de hoja ancha (Fig. 1E). Que los bosques influyen en el clima se ha postulado durante mucho tiempo. Desde el inicio del asentamiento europeo de América del Norte, se creía que la tala de bosques para el cultivo, los productos de madera y el asentamiento alteraron el clima (4). Hoy en día, los científicos tienen una amplia gama de metodologías, que incluyen torres de flujo de covarianza, sistemas de enriquecimiento de CO₂ al aire libre, sensores satelitales y modelos matemáticos para investigar el acoplamiento entre los bosques y la atmósfera. Ahora se entiende que los bosques y los usos humanos de los bosques proporcionan importantes forzamientos climáticos y retroalimentaciones (3), que el cambio climático puede afectar negativamente las funciones del ecosistema (5), y que los bosques se pueden manejar para mitigar el cambio climático (6). Sin embargo, lo que falta es una ciencia que integre los numerosos servicios climáticos de los bosques que interactúan con los impactos del cambio global para informar la política de mitigación del cambio climático. En consecuencia, este artículo revisa las interacciones de la biosfera-atmósfera en los bosques tropicales, templados y boreales. Se hace hincapié en los procesos biogeofísicos (albedo y evapotranspiración) (7), su comparación con los procesos biogeoquímicos (ciclo del carbono) (8) y la alteración del acoplamiento forestal-atmosférico a través de procesos biogeográficos (uso del suelo y dinámica de la vegetación) (9). La ecología de los modelos climáticos La influencia de los bosques en el clima a gran escala es difícil de establecer directamente a través de observaciones. Un examen cuidadoso de los datos climáticos a veces puede revelar una influencia ecológica, como el efecto de la emergencia de la hoja en la evapotranspiración de primavera y la temperatura del aire. Las torres de flujo de covarianza Eddy y los experimentos de campo proporcionan una visión a escala local de las interacciones de la atmósfera forestal, y los avances en la ciencia de la percepción remota pueden ayudar a la extrapolación de este conocimiento a escalas espaciales más grandes. Sin embargo, más a menudo, nuestra comprensión de cómo los bosques afectan el clima proviene de modelos atmosféricos y sus parametrizaciones numéricas de la superficie terrestre de la Tierra (10). Las simulaciones climáticas pareadas, una que sirve como control para comparar contra otra simulación con vegetación alterada, demuestran una influencia ecológica en el clima. Los modelos atmosféricos requieren flujos de energía, humedad e impulso en la superficie terrestre como condiciones límite para resolver ecuaciones numéricas de física y dinámica atmosférica. La primera generación de parametrizaciones de la superficie terrestre desarrollada a fines de los años sesenta y setenta utilizó formulaciones aerodinámicas a granel de intercambio de energía sin representar explícitamente la vegetación [material en línea de apoyo (SOM)]. La disponibilidad de agua del suelo regula el flujo de calor latente, y el ciclo hidrológico, cuando se incluyó, se simplificó a un modelo de "cubeta" de agua del

suelo. En este enfoque, la precipitación llena la columna del suelo hasta una capacidad específica de retención de agua, más allá de la cual se escurre la lluvia. A mediados de la década de 1980, la segunda generación de parametrizaciones de la superficie terrestre incluía el ciclo hidrológico y los efectos de la vegetación sobre la energía y los flujos de agua. Estos modelos representan explícitamente el dosel de las plantas, incluida la transferencia radiativa, los procesos turbulentos por encima y dentro del dosel, y los controles físicos y biológicos de la evapotranspiración (Fig. 2A). También se incluye la cubierta de nieve, el perfil del agua del suelo y las influencias de la vegetación en el ciclo hidrológico (Fig. 2B). A mediados de la década de 1990, la teoría fisiológica de las plantas avanzó aún más la incorporación del control biológico de la evapotranspiración en la tercera generación de modelos. Los modelos ahora vinculan rutinariamente la bioquímica de la fotosíntesis con la biofísica de la conductancia estomática. La fotosíntesis y la conductancia de las hojas se escalan al dosel de la planta en función de la asignación óptima de nitrógeno y la capacidad fotosintética en relación con la disponibilidad de luz. Las simulaciones con estos modelos han demostrado rutinariamente la regulación biogeofísica del clima por la vegetación a través del albedo, los flujos turbulentos y el ciclo hidrológico (10). La generación actual de modelos tiene una capacidad más allá de la hidrometeorología e incorpora avances ecológicos en el modelado biogeoquímico y biogeográfico (10). Muchos modelos simulan el ciclo del carbono (Fig. 2C) y la dinámica de la vegetación (Fig. 2D). En estos modelos, la biosfera y la atmósfera forman un sistema acoplado por el cual el clima influye en las funciones del ecosistema y la biogeografía, que se retroalimentan para afectar el clima. Gran parte de la vegetación natural del mundo ha sido limpiada para la agricultura (Fig. 3D), y algunos modelos también incluyen cambios en el uso del suelo. Bosques tropicales Las simulaciones del modelo climático muestran que los bosques tropicales mantienen altas tasas de evapotranspiración, disminuyen la temperatura del aire en la superficie y aumentan las precipitaciones en comparación con los pastizales (SOM). La región más estudiada es la Amazonía, donde la conversión a gran escala de bosques a pastos crea un clima más cálido y seco. El calentamiento de la superficie que surge del bajo albedo de los bosques se compensa con fuertes evapoForests en el Centro Nacional de Investigación Atmosférica Flux, P.O. Box 3000, Boulder, Colorado 80307, ??EE. UU. Correo electrónico: bonan@ucar.edu 1444 13 DE JUNIO DE 2008 VOL 320 SCIENCE www.sciencemag.org el 20 de octubre de 2010 www.sciencemag.org Descargado de enfriamiento por enfriamiento. Se observan resultados similares en África tropical y Asia, y la influencia climática de los bosques tropicales puede extenderse a los extratropicales a través de teleconexiones atmosféricas. Sin embargo, las interacciones bosque-atmósfera son complejas, y la deforestación heterogénea a pequeña escala puede producir circulaciones de mesoescala que mejoran las nubes y la precipitación. Las mediciones de la torre de flujo en la Amazonía brasileña confirman que los bosques tienen menor albedo en comparación con el pasto, mayor radiación neta y mayor evapotranspiración, particularmente durante la estación seca (11, 12), produciendo una capa límite superficial, fría y húmeda. Las observaciones muestran que la transpiración forestal se mantiene durante la estación seca (11); Esto se observa también en los flujos de CO₂ (12) y el monitoreo satelital de la vegetación (13, 14), en mayor medida que la representada en muchos modelos. Los bosques tropicales contienen ~ 25% del carbono en la biosfera terrestre (Fig. 1B), representan ~ 33% de la producción primaria neta terrestre (NPP) (2) y pueden secuestrar grandes cantidades de carbono anualmente (Fig. 1C). La deforestación liberó 1.6 PgC año⁻¹ durante la década de 1990, principalmente en los trópicos (3). Los análisis atmosféricos sugieren que los bosques tropicales son carbono

neutral o sumideros de carbono, lo que implica la compensación de la absorción de carbono por ecosistemas tropicales no alterados (3, 15). El equilibrio neto entre estos procesos es probablemente un beneficio positivo que mitiga el calentamiento global a través del enfriamiento por evaporación y el secuestro de carbono (8). Sin embargo, se requiere un análisis más completo de las interacciones bosque-atmósfera. La biogeoquímica de los bosques tropicales y la quema de biomasa afecta la química atmosférica y los aerosoles, que pueden alterar las nubes y la lluvia (16). La variabilidad climática interanual modula el acoplamiento bosque-atmósfera. Hay una liberación neta de carbono de la biosfera a la atmósfera durante los años cálidos y secos de El Niño, visto en altas tasas de crecimiento atmosférico de CO₂ (3), especialmente en los trópicos (17). La sequía hace que los bosques tropicales sean más susceptibles a la quema durante el desbroce de tierras (18). Sin embargo, la productividad de los bosques tropicales puede ser más resistente a la sequía de lo esperado (14). El futuro de los bosques tropicales está en riesgo en un mundo más cálido y poblado del siglo XXI. Los bosques tropicales son vulnerables a un clima más cálido y seco (19), que puede exacerbar el calentamiento global a través de una retroalimentación positiva que disminuye el enfriamiento por evaporación, libera CO₂ e inicia la extinción de los bosques (20). La pérdida de bosques naturales en todo el mundo en los trópicos durante la década de 1990 fue de hasta 152,000 km² año⁻¹ (1), y los bosques amazónicos fueron talados a una tasa de ~ 25,000 km² año⁻¹ (19). Se espera que tales presiones de uso de la tierra continúen en el futuro y puedan cambiar la región amazónica a un clima permanentemente más seco una vez que se alcance un umbral crítico de limpieza. Las simulaciones del modelo de clima de bosques boreales muestran que el albedo de superficie baja durante la temporada de nieve, evidente en las mediciones de flujo local (21) y el albedo de superficie derivado de satélite (Fig. 1D), calienta el clima en comparación con la ausencia de árboles (SOM). En consecuencia, el bosque boreal tiene el mayor efecto biogeofísico de todos los biomas en la temperatura global media anual (7). La pérdida de bosque boreal proporciona una retroalimentación positiva para la glaciación (22), mientras que la expansión del bosque a mediados del Holoceno hace 6000 años amplificó el calentamiento (23). Los bosques boreales difieren en su división de la radiación neta en flujos de calor sensibles y latentes. Los bosques de coníferas tienen una fracción de evaporación de verano baja (definida como la relación entre el flujo de calor latente y la energía disponible) en comparación con los bosques caducifolios de hoja ancha, que producen altas tasas de intercambio de calor sensible y capas límite atmosféricas profundas (21). Las mediciones de la torre de flujo ilustran la posibilidad de que los cambios en la composición de las especies, derivados del cambio en el régimen de incendios, afecten el clima (24). A lo largo de una cronosecuencia de incendios de 80 años en Alaska, la radiación neta anual disminuyó en un 31% en una quemadura de 3 años.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z																																								
Área	Albedo	Flujo de calor latente	Flujo de calor sensible	Flujo de calor total	Flujo de carbono	Resistencia al dosel	Existencias de carbono	NEP	Bosque no forestal	No bosque	Hojas de hoja perenne	Hojas de hoja caduca	Bosque mixto	Bosque tropical	Bosque templado	Bosque boreal	Bosque no forestal	Bosque templado	Bosque boreal	120100	80	60	40	20	0	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0.0	2500	2000	1500	400	300	200	100	0	1000	500	2.00	1.50	1.00	0.50	0.00	0	10100	1000	10000	Húmedo	Evergreen	Deciduo	Semiarid	Evergreen	Caducifolio	Trigo	Maíz	Caducifolio	Jack pine	Oak	savanna	Libre de nieve	Cubierto de nieve

Fig. 1. Procesos biogeoquímicos (carbono) y biogeofísicos (albedo y evapotranspiración) por los cuales los ecosistemas terrestres afectan el clima (SOM). (A y B) Extensión geográfica y reserva de carbono total (planta y suelo) de biomas no

forestales (verdes) y forestales (azules) (2). Los biomas forestales individuales también se muestran y suman el total del bosque. (C) Producción neta de ecosistemas (NEP) para bosques tropicales, templados y boreales (47). Los símbolos individuales que se muestran significan NEP para bosque tropical siempreverde húmedo, tres tipos de bosque templado y tres tipos de bosque boreal. Las barras verticales muestran NEP promediada en todos los tipos de bosque. (D) Albedo de haz directo derivado de satélite para biomas no forestales (verdes) y forestales (azules) cubiertos de nieve y sin nieve (48). También se muestran los biomas forestales individuales. (E) Evapotranspiración normalizada por su tasa de equilibrio en relación con la resistencia del dosel para trigo, maíz, bosque caducifolio templado, bosque de coníferas de pino de jack boreal y sabana de roble (49, 50). Se muestran puntos de datos individuales y la media para cada tipo de vegetación. www.sciencemag.org CIENCIA VOL 320 13 DE JUNIO DE 2008 1445 SECCIÓN ESPECIAL el 20 de octubre de 2010 www.sciencemag.org Descargado del sitio dominado por pastos y un bosque de álamos temblones (*Populus tremuloides*) de 15 años en comparación con un de 80 años bosque de abeto negro (*Picea mariana*), principalmente en primavera y verano. El flujo de calor sensible anual disminuyó en más del 50% en comparación con el sitio de 80 años, principalmente en primavera y verano. Durante el verano, el bosque de álamo temblón tuvo el flujo de calor latente más alto, el flujo de calor sensible más bajo y la relación Bowen de mediodía más baja (definida como la relación del flujo de calor sensible al flujo de calor latente). Los ecosistemas boreales almacenan una gran cantidad de carbono en el suelo, el permafrost y los humedales (2) y contribuyen al sumidero de carbono terrestre del hemisferio norte (3), aunque los bosques maduros tienen una baja ganancia anual de carbono (Fig. 1C). El forzamiento climático debido al aumento del albedo puede compensar el forzamiento de la emisión de carbono, de modo que la deforestación boreal enfría el clima (8). Se extraen conclusiones similares del análisis exhaustivo del forzamiento climático de los incendios boreales (25). El forzamiento a largo plazo es un equilibrio entre el aumento posterior al fuego en el albedo de la superficie y el forzamiento radiativo de los gases de efecto invernadero emitidos durante la combustión. Promediado durante un ciclo de fuego de 80 años, el forzamiento negativo del albedo de la superficie excede el forzamiento biogeoquímico positivo más pequeño. Sin embargo, en el primer año después del incendio, el forzamiento biogeoquímico anual positivo de la emisión de gases de efecto invernadero, el ozono, el carbono negro depositado en la nieve y el hielo, y los aerosoles exceden el forzamiento negativo del albedo. Los bosques boreales son vulnerables al calentamiento global (5). Los árboles pueden expandirse hacia la tundra, pero desaparecen. Flujo momentáneo. Velocidad del viento. flujo de calor Precipitación Intercepción Evaporación Sublimación Infiltración Derretimiento Nieve Transpiración Evaporación Flujo del tallo de la escorrentía Escorrentía superficial Drenaje Fotosíntesis Fuego Respiración autótrofa Follaje Tallo Raíz Suelo Suelo carbono Carbono Nutriente Caída de Litterfall Radiación solar directa rs ra ra Transpiración Respiración heterotrófica Mineralización Urbanización F Dinámica de la vegetación D Crecimiento del suelo E Competición Deforestación Abandono de la granja Fig. 2. La generación actual de modelos climáticos trata la biosfera y la atmósfera como un sistema acoplado. Las parametrizaciones de la superficie terrestre representan la biogeofísica, biogeoquímica y biogeografía de los ecosistemas terrestres. (A) Flujos de energía superficial y (B) el ciclo hidrológico. Estos son los procesos biogeofísicos centrales. Muchos modelos también incluyen (C) el ciclo del carbono y (D) la dinámica de la vegetación para que los ecosistemas vegetales respondan al cambio climático. Algunos modelos también incluyen (E) uso del suelo y (F) urbanización para representar la alteración humana de la biosfera. CRÉDITO: CARIN CAIN 1446 13 DE JUNIO DE

2008 CIENCIA VOL 320 www.sciencemag.org Bosques en flujo el 20 de octubre de 2010 www.sciencemag.org Descargado de los ecotonos de las praderas del sur. En el bosque boreal principal, puede haber pérdida de árboles de hoja perenne y un cambio hacia los árboles de hoja caduca. Los bosques siberianos pueden colapsar en algunas áreas y volverse más perennes en el norte. El aumento de la perturbación por incendios o brotes de insectos desplazará el bosque a una clase de edad más joven. El forzamiento climático derivado de la edad de soporte más joven puede ser comparable al que surge de los cambios de bioma (24). Bosques templados Gran parte de los bosques templados del este de los Estados Unidos, Europa y el este de China han sido talados para la agricultura (Fig. 3D). Las tierras de cultivo tienen un albedo más alto que los bosques (Fig. 1D), y muchas simulaciones de modelos climáticos encuentran que los árboles calientan la temperatura del aire en la superficie en relación con los cultivos (SOM). El enmascaramiento del albedo de la nieve por parte de los árboles es importante en climas templados fríos con nieve. Los estudios de los bosques del este de los Estados Unidos encuentran que los árboles también mantienen un clima más cálido en verano en comparación con los cultivos debido a su bajo albedo, aumentado por el enfriamiento por evaporación de los cultivos y retroalimentaciones con la atmósfera que afecta las nubes y las precipitaciones (26). La influencia de los cultivos en la evapotranspiración se observa en las mediciones de la torre de flujo. El enfriamiento por evaporación de la estación de crecimiento es mayor en los cultivos regados en comparación con los bosques, y estas plantas ejercen menos resistencia a la evaporación (Fig. 1E). Aunque los modelos climáticos globales encuentran que los bosques templados en el este de los Estados Unidos calientan la temperatura del verano (26), las simulaciones del modelo de mesoescala del clima de julio de los Estados Unidos encuentran que los árboles aumentan la evapotranspiración y disminuyen la temperatura del aire en la superficie en comparación con los cultivos (27, 28). Las retroalimentaciones atmosféricas que alteran la nubosidad afectan la magnitud de la respuesta de temperatura en estas simulaciones. Los análisis de torres de flujo muestran que las coníferas y los bosques caducifolios de hoja ancha en Carolina del Norte tienen una temperatura de radiación superficial más baja que los campos de hierba debido a una mayor conductancia aerodinámica y enfriamiento evaporativo de los árboles en comparación con los pastos (29), pero lo mismo puede no pertenecer a las tierras de cultivo (Fig. 1E). La variabilidad climática interanual afecta el acoplamiento de la biosfera-atmósfera. En Europa occidental, los bosques y las tierras agrícolas tienen una temperatura de radiación superficial comparable cuando el suelo está húmedo, pero responden de manera diferente a la sequía (30). El bosque mantiene la vegetación verde, como lo indica la diferencia normalizada del índice de vegetación, aunque la temperatura de la superficie y el flujo de calor sensible aumentan con la sequía. El verdor de la vegetación en las tierras de cultivo disminuye en ~ 50%, la superficie se calienta 13 ° C más que en el bosque, y la mejora de la sequía en el flujo de calor sensible es mayor que en el bosque. La respuesta diferente a la sequía surge de las raíces profundas de los árboles y su acceso a depósitos más profundos de agua del suelo. Los bosques templados contienen ~ 20% de la biomasa vegetal del mundo y ~ 10% del carbono terrestre (Fig. 1B). Las tasas de secuestro de carbono de los bosques maduros son altas (Fig. 1C), pero los bosques templados en los Estados Unidos históricamente han sido fuentes de carbono debido a la deforestación (31). Las tendencias socioeconómicas en reforestación y extinción de incendios han cambiado estos bosques a un sumidero de carbono. Se observan tendencias similares en Europa (3). El forzamiento climático neto de los bosques templados es altamente incierto. Los forzamientos biogeofísicos competitivos del bajo albedo durante el invierno y la evapotranspiración durante el verano influyen en la temperatura media anual (7). Un albedo más alto con

pérdida de cobertura forestal podría compensar la emisión de carbono, de modo que el efecto climático neto de la deforestación templada es insignificante (8), o la evapotranspiración reducida con pérdida de árboles podría amplificar el calentamiento biogeoquímico. El futuro de los bosques templados y sus servicios climáticos es altamente incierto. Es probable que el actual sumidero de carbono en los bosques del este de los Estados Unidos disminuya a medida que los bosques en recuperación maduren (31), y estos bosques enfrentan una presión incierta por el cambio climático, el aumento del CO₂ atmosférico y la deposición antropogénica de nitrógeno (5). Es probable que en el futuro cambie el equilibrio entre los árboles de hoja caduca y los de hoja perenne. Los bosques templados son particularmente vulnerables al uso humano de la tierra. La tendencia en las últimas décadas ha sido hacia el abandono de las granjas, la reforestación y la invasión leñosa de la extinción de incendios, pero satisfacer las necesidades de una creciente población mundial podría ejercer una mayor presión sobre estos bosques.

Retroalimentación del ciclo del carbono El ciclo del carbono ha sido reconocido desde hace tiempo como importante para comprender el cambio climático. Los modelos climáticos que incluyen el ciclo del carbono terrestre y oceánico simulan una retroalimentación positiva entre el ciclo del carbono y el calentamiento climático que aumenta la fracción de emisiones de CO₂ antropogénicas en el aire y amplifica el calentamiento (3, 32). En una comparación de 11 modelos de diversos grados de complejidad, las retroalimentaciones del ciclo del carbono y el clima aumentan el CO₂ atmosférico a fines del siglo XXI en un 4 a 44% (media multimodelo, 18%), equivalente a 20 a 224 adicionales (partes por millones) (ppm) (media multimodelo, 87 ppm) (3). Los análisis de las concentraciones de CO₂ atmosférico observadas indican que está ocurriendo tal disminución en la eficiencia del ciclo del carbono para almacenar CO₂ antropogénico en el océano y la tierra, y en mayor medida de lo estimado por los modelos (33). Gran parte de la incertidumbre del modelo surge de la biosfera terrestre (3, 32). Las plantas responden al aumento del CO₂ atmosférico a través de la mejora fotosintética, y esta "fertilización con CO₂" es una respuesta negativa a una mayor concentración de CO₂ atmosférico. En la comparación multimodelo, el almacenamiento de carbono terrestre aumenta con el CO₂ atmosférico más alto en todos los modelos, impulsado por un aumento del 12 al 76% en la NPP con duplicación de CO₂ (media multimodelo, 48%), compensado ligeramente por la respiración heterotrófica mejorada (3). Los estudios de enriquecimiento de CO₂ al aire libre en bosques encuentran que un aumento de ~ 50% en la concentración de CO₂ atmosférico sostenido durante varios años aumenta la NPP en un 23% (34), pero el resultado a largo plazo no está claro, especialmente cuando se consideran las interacciones con la disponibilidad de nitrógeno (5).

El cambio climático reduce el almacenamiento de carbono de la fertilización con CO₂. El almacenamiento de carbono terrestre disminuye con el calentamiento en los 11 modelos (media multimodelo, -79 Pg C ° C-1), pero esto varía mucho entre los modelos (3). La tasa de renovación de carbono en el suelo aumenta de 2 a 10% ° C-1 en todos los modelos en una retroalimentación climática positiva (media multimodelo, 6% ° C-1). La NPP terrestre disminuye hasta -6% ° C-1 en siete modelos (media multimodelo, -3% ° C-1) y aumenta de 1 a 2% ° C-1 en cuatro modelos. El cambio climático puede mejorar la NPP (retroalimentación negativa) en los bosques boreales donde la temperatura aumenta y disminuir la NPP (retroalimentación positiva) en los bosques tropicales donde una mayor demanda de evaporación seca el suelo (35). Las respuestas ecológicas al cambio climático alteran el funcionamiento biogeofísico de los bosques y también proporcionan retroalimentación climática. Estas retroalimentaciones "indirectas" del ciclo del carbono incluyen cambios en la conductancia estomática, el índice de área foliar y la composición de especies. La conductancia estomatal disminuida con

una concentración de CO₂ atmosférico más alta reduce la evapotranspiración y refuerza el calentamiento (SOM). Una cubierta arbórea más extensa puede mejorar el calentamiento en los bosques boreales al disminuir el albedo de la superficie. La evapotranspiración reducida en un clima más seco puede iniciar una retroalimentación climática positiva que conduzca a la pérdida de bosques tropicales (20). Obligación del uso de la tierra Aunque la emisión de carbono de la tala de bosques se ha estudiado durante mucho tiempo, solo recientemente se ha reconocido el forzamiento biogeofísico del clima por el uso de la tierra. Grandes extensiones de tierras forestales se han convertido en agricultura (Fig. 3D), y el calentamiento climático durante la era industrial puede ser más pequeño de lo esperado por el aumento del CO₂ atmosférico solo, principalmente por el aumento del albedo de primavera con la pérdida de bosques extratropicales (36). La emisión de carbono del uso del suelo amortigua el enfriamiento biogeofísico. Las señales competitivas dominantes de la deforestación histórica son un aumento en el albedo de la superficie contrarrestado por la emisión de carbono a la atmósfera. El enfriamiento biogeofísico puede superar el calentamiento biogeoquímico a escala global (37) o solo puede compensar parcialmente el calentamiento (38). El efecto neto de estos procesos competitivos es pequeño a nivel mundial, pero es grande en las latitudes templadas y altas del norte, donde el enfriamiento debido a un aumento en el albedo de la superficie supera el calentamiento debido a la emisión de CO₂ por el uso de la tierra. Las tendencias climáticas durante el siglo XXI también deberían estar impulsadas por las interacciones entre las emisiones de CO₂, el uso de la tierra y los comentarios de la atmósfera forestal. El forzamiento biogeofísico del uso del suelo por el clima puede ser en algunas regiones de magnitud similar al cambio climático por gases de efecto invernadero. La historia narrativa A2 del Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) sobre escenarios de emisiones (SRES) tiene una alta emisión de CO₂ (SOM) y simulaciones de modelos climáticos de Feddema et al. (39) producen un calentamiento de 2 ° C de la temperatura planetaria durante el siglo XXI en ausencia de un cambio en la cubierta terrestre. La historia A2 describe la expansión agrícola generalizada con la mayoría de las tierras aptas para la agricultura utilizadas para la agricultura en 2100 para mantener una gran población mundial (fig. S1). La pérdida de bosques conduce a un calentamiento adicional en Amawww.sciencemag.org CIENCIA VOL 320 13 DE JUNIO DE 2008 1447SECCIÓN ESPECIAL el 20 de octubre de 2010 www.sciencemag.org Descargado de zonia, pero enfriamiento que mitiga el calentamiento en latitudes medias (39). La historia narrativa B1 es un escenario de baja emisión de gases de efecto invernadero. El abandono agrícola y la pérdida de rendimiento de reforestación de las tierras agrícolas para 2100 debido a los supuestos aumentos en la eficiencia agrícola y la disminución de la población (figura S1). El modelo simula un calentamiento de 1 ° C en ausencia de cambios en la cobertura del suelo y un forzamiento más débil del uso del suelo. Cuando se incluye el ciclo del carbono, las diferentes historias de SRES sobre emisiones de combustibles fósiles y uso de la tierra pueden generar climas similares en el siglo XXI a pesar de trayectorias socioeconómicas muy diferentes (9). La expansión generalizada de la agricultura en A2 conduce al enfriamiento biogeofísico. Los procesos biogeofísicos conducen al calentamiento en B1, principalmente debido a la regeneración de bosques templados. En las historias de A2 y B1, la pérdida neta de carbono de la deforestación provoca un calentamiento biogeoquímico, mayor en A2 debido a la deforestación extensa y más débil en B1 debido a la reforestación templada y menos deforestación tropical. El calentamiento biogeoquímico compensa el enfriamiento biogeofísico en A2 para proporcionar un calentamiento global neto. El calentamiento neto B1 es similar al A2 porque el calentamiento biogeofísico moderado de la reforestación

templada aumenta el calentamiento biogeoquímico débil de la deforestación tropical. Necesidades de investigación A través del albedo, la evapotranspiración, el ciclo del carbono y otros procesos, los bosques pueden amplificar o amortiguar el cambio climático derivado de la emisión antropogénica de gases de efecto invernadero. El forzamiento climático negativo en los bosques tropicales debido a las altas tasas de acumulación de carbono aumenta el enfriamiento por evaporación (Fig. 3A). El ciclo combinado del carbono y el efecto biogeofísico de los bosques tropicales pueden enfriar el clima global, pero su resistencia a la sequía, su estado como sumideros de carbono, interacciones de incendios, aerosoles y gases reactivos con el clima, y ??los efectos de la deforestación a pequeña escala en las nubes y la precipitación son incógnitas clave. El forzamiento climático de los bosques boreales es menos seguro (Fig. 3C). El albedo de baja superficie puede ser mayor que el secuestro de carbono para que los bosques boreales calienten el clima global, pero también se debe considerar el forzamiento neto del fuego, así como los efectos de los bosques tropicales B Bosques templados C Bosques boreales D Fuerte enfriamiento por evaporación (-) Fuerte almacenamiento de carbono (-) Disminución moderada del albedo (+) Perturbación, incendios y aerosoles Nubes y precipitación, incendios, aerosoles y química reactiva Refrigeración evaporativa moderada (-) Almacenamiento de carbono fuerte (-) Disminución albedo moderada (+) Biogeografía Refrigeración evaporativa débil (-) Moderada almacenamiento de carbono (-) Fuerte disminución de albedo (+) Vegetación natural Tierras de cultivo Bosque tropical Bosque templado Bosque boreal Sabana Pastizales / Arbustos Tundra Semi-desierto / Desierto / Hielo 0-10% 10-20% 20-30% 30-40% 40- 50% 50-60% 60-70% 70-80% 80-90% 90-100% Fig. 3. Servicios climáticos en (A) bosques tropicales, (B) templados y (C) boreales. Los cuadros de texto indican procesos clave con servicios climáticos inciertos. (D) Biogeografía de vegetación natural en ausencia de usos humanos de la tierra y las tierras de cultivo (porcentaje de cobertura) durante la década de 1990. Los mapas de vegetación son de (51). CRÉDITO: CARIN CAIN 1448 13 DE JUNIO DE 2008 CIENCIA VOL 320 www.sciencemag.org Bosques en flujo el 20 de octubre de 2010 www.sciencemag.org Descargado de la turbante y la edad de los flujos de superficie. El beneficio climático de los bosques templados es más incierto (Fig. 3B).

+
+
+
+
+

part 2

La reforestación y la forestación pueden secuestrar carbono, pero el albedo y los forzamientos de evaporación son moderados en comparación con otros bosques y la influencia de la evaporación no está clara. Gran parte de nuestro conocimiento de las influencias forestales en el clima, y ??nuestra capacidad para informar la política de mitigación del cambio climático, proviene de modelos. Los modelos del clima y la biosfera son abstracciones de complejos procesos físicos, químicos y biológicos en el sistema de la Tierra. La extrapolación de la comprensión a nivel de proceso del funcionamiento del ecosistema obtenida de experimentos de laboratorio o estudios de campo específicos del sitio a modelos climáticos a gran escala sigue siendo un desafío desalentador. Los modelos de biosfera deben estar mejor restringidos con datos de observación en una gama de escalas desde experimentación in situ, mediciones de torres de flujo del funcionamiento del ecosistema, síntesis ecológicas de investigación de ecosistemas a largo plazo, monitoreo satelital de la vegetación y monitoreo atmosférico de CO₂. La síntesis de los datos de la torre de flujo de una variedad de regiones boreales,

templadas y tropicales en diversas etapas del desarrollo del ecosistema es esencial para comprender el funcionamiento de los bosques en amplios gradientes de clima, suelos, historial de perturbaciones y tipos funcionales de plantas (40). El monitoreo a gran escala del "reverdecimiento" del hemisferio norte (41) o la respuesta de la vegetación a la sequía (42) proporciona pruebas esenciales de la respuesta del modelo a las perturbaciones. Los análisis globales de CO₂ atmosférico proporcionan restricciones clave para el funcionamiento biosférico para aumentar la validación del modelo de nivel de proceso en lugares específicos (15). Los modelos globales del sistema biosfera-atmósfera todavía están en pañales, y los procesos que aún no están incluidos en los modelos pueden iniciar retroalimentaciones imprevistas. El efecto del nitrógeno sobre la absorción de carbono (43), los efectos fisiológicos de la alta concentración de ozono (44), la mejora fotosintética por radiación difusa (45) y la alteración (46) están poco representados, si es que lo están. Las representaciones realistas de la dinámica de la vegetación, especialmente las escalas temporales de la respuesta de la vegetación a las perturbaciones, que durante mucho tiempo fueron el pilar de los modelos de ecosistemas forestales, apenas se consideran en la generación actual de modelos. Los incendios, los aerosoles y la química reactiva tampoco están bien representados en los modelos. El ciclo del carbono y su respuesta a múltiples impulsores interactivos del cambio global es un aspecto clave del forzamiento biosférico del clima. También lo son los usos humanos de la tierra y las tendencias socioeconómicas y las respuestas sociales a un clima cambiante que impulsa el uso de la tierra. ¿Cuáles son las mayores incertidumbres al simular el ciclo del carbono del siglo XXI? El paradigma predominante de los modelos actuales es que la fertilización con CO₂ impulsa los sumideros de carbono terrestres, debilitados por el calentamiento global (3, 32). Esta retroalimentación del ciclo del carbono y el clima seguramente se perfeccionará con más estudios que incorporen el ciclo del nitrógeno. La explicación de la perturbación causada por incendios forestales y brotes de insectos debilita aún más el secuestro de carbono terrestre en los bosques canadienses (46). Las trayectorias del uso de la tierra impulsadas por las necesidades socioeconómicas y la implementación de políticas también entrarán en juego y tendrán impactos biogeofísicos y biogeoquímicos competitivos sobre el clima (9). A medida que se entienden mejor los beneficios climáticos de los bosques, se pueden diseñar políticas de uso de la tierra para mitigar el cambio climático (6). Se ha inferido, por ejemplo, que es probable que la forestación tropical "ralentice" el calentamiento global, mientras que la forestación templada tiene un beneficio climático "poco o nada" y la forestación boreal es "contraproducente" (8). Estas políticas deben reconocer la multitud de influencias forestales, sus efectos competitivos sobre el clima, sus diferentes escalas espaciales y temporales, y su efectividad y sostenibilidad a largo plazo en un clima cambiante. Una evaluación integrada de las influencias forestales implica una evaluación más allá del albedo, la evapotranspiración y el carbono para incluir otros gases de efecto invernadero, aerosoles biogénicos y gases reactivos. El impacto geográfico de estos procesos varía, al igual que su escala temporal de forzamiento climático. Los gases de efecto invernadero están bien mezclados en la atmósfera e influyen en el clima global; Los comentarios biogeofísicos tienen un impacto regional. Los procesos biogeofísicos influyen en el clima más inmediatamente que el ciclo del carbono. Las tasas lentas de acumulación de carbono en los bosques boreales pueden compensarse a corto plazo con efectos albedo más rápidos. La forma en que los bosques atenúan o amplifican el cambio climático variará con el calentamiento global. El enmascaramiento de la vegetación del albedo de la nieve se vuelve menos importante en un mundo más cálido con una capa de nieve menos extensa. El enfriamiento por evaporación de los bosques

disminuye si las sequías se vuelven más comunes. La interrelación de la ciencia del cambio climático, los impactos climáticos en los ecosistemas y la política de mitigación del cambio climático requiere que se estudien juntos en un marco interdisciplinario para crear una ciencia sólida al servicio de la humanidad.